

Mustergültige Erkenntnis

Mustererkennung spielt in der Astronomie eine zentrale Rolle, hilft aber auch beim Umgang mit Multimedia-Daten und in der Medizin. Forscher um **Wolfram Bunk** am Garchinger **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik** haben dafür eine besonders zuverlässige Methode entwickelt.

TEXT **CHRISTIAN BUCK**

Bartók, Beethoven oder Brahms? Der Computer von Wolfram Bunk kennt die Antwort – denn der Physiker vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching bei München hat gemeinsam mit einigen Kollegen aus einem gewöhnlichen Apple-Notebook einen Experten für Musik gemacht. *Audio-Fingerprinting* heißt die Technologie, der man sogar bei der Arbeit zusehen kann: Sobald Wolfram Bunk ein Musikstück aus dem Speicher des Computers abrufen, startet die Analyse, und der Bildschirm füllt sich mit Leben. Farbflächen in verschiedenen Rottönen auf dem Monitor stehen dabei für klassische Komponisten wie Beethoven, Mozart und Vivaldi, aber auch Rockmusiker wie Peter Gabriel und Bands wie Genesis und Pink Floyd.

Kaum hat die Musik begonnen, beginnen weiße Balken über den roten Flächen ihren analytischen Tanz: Je höher der Ausschlag ist, desto typischer ist ein Stück für einen bestimmten Künstler. Es dauert nicht lange, bis ein Balken dominiert und die anderen immer kleiner werden – der Computer ist offensichtlich fündig geworden. „Nach einer etwa 30-sekündigen Hörprobe erkennt das System den Komponisten in rund 90 Prozent der Fälle“, erklärt Bunk. In diesem Fall lautet seine Diagnose: Beethoven. Stimmt genau!

Beim Audio-Fingerprinting spielen Musik und Mathematik zusammen, die ja schon seit Pythagoras als eng miteinander verwandt gelten. Der griechische Philosoph dachte über musikalische Intervalle und einfache Zahlenverhältnisse nach. Bunk hat mit seinen Kollegen Thomas Aschenbrenner und Roberto Monetti vom Garchinger Max-Planck-Institut eine Methode entwickelt, mit der sich aus Musikstücken charakteristische Eigenschaften extrahieren lassen – ähnlich den Fingerabdrücken, die typisch für einen Menschen sind. Für die Analyse werden 0,1 Sekunden lange Abschnitte der Musikstücke in ihre Frequenzen – ihr Spektrum – zerlegt und auf typische Merkmale hin untersucht.

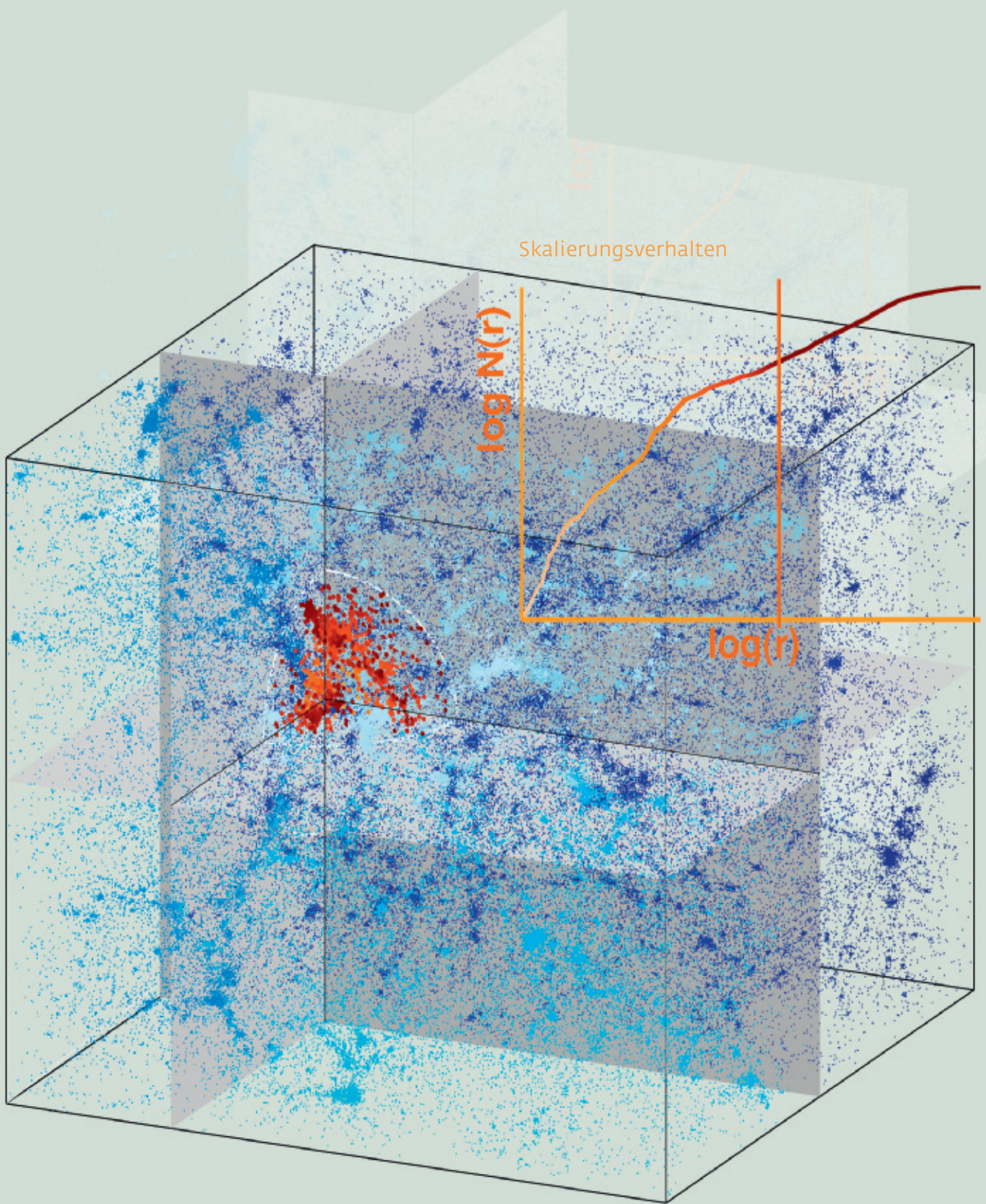
TYPISCHE MUSIKSCHNIPSEL

„Als Ergebnis werden jedem Stück bis zu zehn repräsentative Spektren zugeordnet“, so Bunk. „Soll das System nun eine neue Komposition erkennen, berechnet der Computer auch für dieses Werk die Klangmerkmale in Echtzeit.“ Gleichzeitig werden in der Datenbank des Computers Ähnlichkeiten gesucht, mit dem das System ein unbekanntes Stück einem Komponisten zuordnet. Wegen der Kürze der prototypischen Spektren fallen nur geringe Datenmengen an, und der Computer braucht nur sehr wenig Zeit, um den Komponisten zu erkennen.

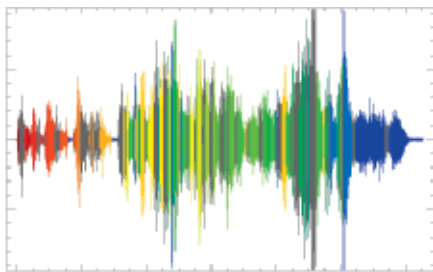
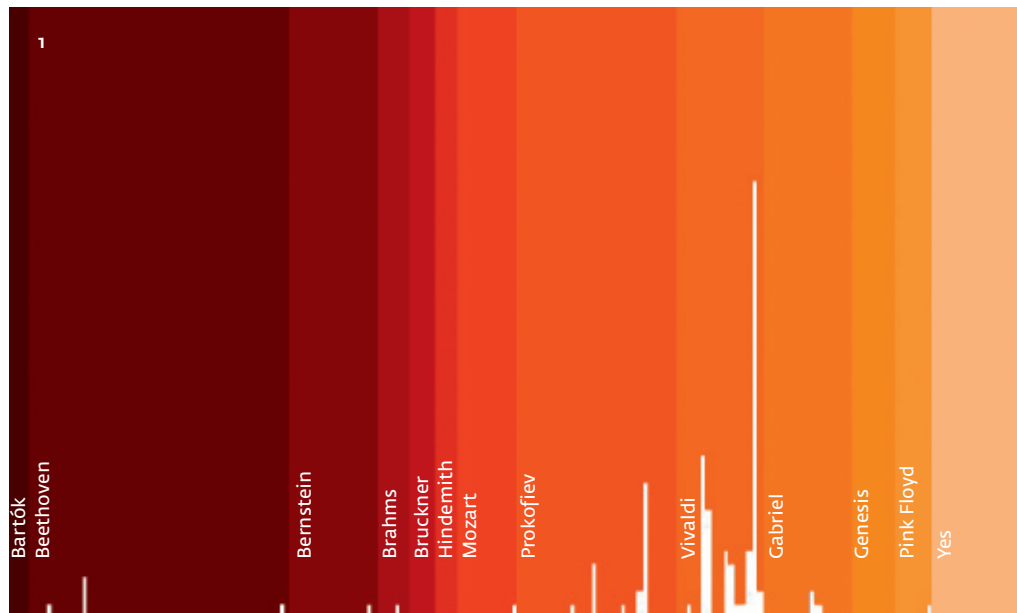
„Dass das System verschiedene Komponisten auseinanderhalten kann, liegt wahrscheinlich an der typischen Instrumentierung und anderen Klangmerkmalen der einzelnen Komponisten“, glaubt Bunk. „Melodien spielen hierbei keine Rolle, da die Analyse auf einer Zeitskala unterhalb der Melodiebildung aufsetzt.“ Die analysierten Audio-Schnipsel sind schlicht zu kurz, um Rückschlüsse auf die Melodie zuzulassen.

Die große Kunst besteht eben darin, die richtigen Repräsentanten für ein Musikstück auszuwählen. „Zufällig ausgewählte Spektren enthalten in der Regel nicht die notwendige Information“, sagt Bunk. „Notwendig ist vielmehr ein Verfahren, um die besten Fingerprints zu identifizieren.“ Hier kommt die Kompetenz der Garchinger Forscher ins Spiel – denn die Astrophysik verwendet für die Interpretation von gemessenen Daten ausgeklügelte Methoden der Datenanalyse und Statistik.

Ursprünglich wollten die Wissenschaftler Maße für die sehr ungleichmäßige Verteilung der Materie im Weltall zu entwickeln. Dazu ziehen die Astronomen Beobachtungsdaten – etwa von Teleskopen oder Satelliten – heran und rekonstruieren mit ihrer Hilfe das sichtbare Universum, also die Verteilung von Galaxien und Galaxienhaufen, dreidimensional. Das ist die Grundlage



Ein Punkt und seine Umgebung: In einer simulierten Galaxienverteilung untersuchen die Forscher die Struktur mithilfe der Skalierungsindex-Methode. Ausgehend vom Schnittpunkt des Koordinatensystems bestimmen sie die Galaxienverteilung N in Abhängigkeit vom Radius r . Aus dem Grafen rechts oben ermitteln sie das Skalierungsverhalten. Dieses Prozedere wird für jeden Punkt wiederholt und liefert Aussagen über das Verteilungsmuster.



Vivaldi in Farbe: In dem Ausschnitt aus den *Vier Jahreszeiten* werden prototypische Klangmerkmale farbig markiert.

dafür, die Qualität verschiedener kosmologischer Modelle anhand von Beobachtungen zu bewerten. Dabei verfolgen sie nicht das Ziel, die Positionen einzelner Himmelskörper in der Theorie und der Realität miteinander zu vergleichen. „Es geht vielmehr darum, die großräumige Verteilung kosmologischer Strukturen im Modell und der Beobachtung in statistischer Weise miteinander zu vergleichen“, so Bunk. „Daraus ergibt sich dann ganz automatisch die Frage, wie man globale Eigenschaften von Punkteverteilungen charakterisieren kann.“

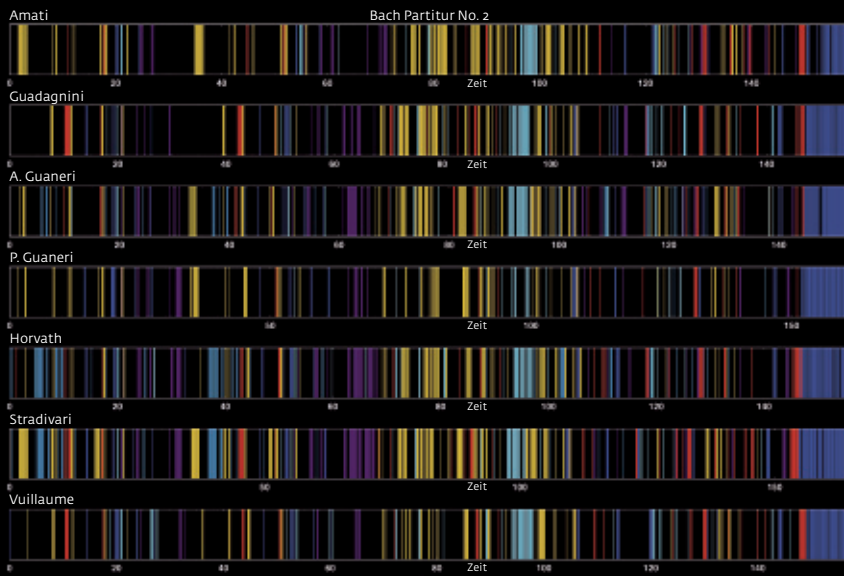
EIN MUSTER LÄSST AUF DIE URSACHE SCHLIESSEN

Das klingt abstrakt, lässt sich aber einfach auf den Alltag übertragen. „Wenn man Sandkörner auf verschiedene Weisen auf einer Fläche verteilt, beispielsweise von Wasser oder vom Wind getrieben, so entstehen dabei jeweils charakteristische Muster“, umschreibt Bunk das Prinzip. „Es kommt gar nicht darauf an, wo die einzelnen Körner liegen, sondern auf globale Eigenschaften dieser Muster, mit deren Hilfe nachträglich ermittelt werden kann, auf welche Weise die Sandkörner verteilt wurden.“ In der Astrophysik können die Forscher auf diese Weise die Aussagen verschiedener kosmologischer Theorien verglei-

chen, die sich beispielsweise durch verschiedene Modelle der Gravitationskraft oder die unterschiedlichen Beiträge der dunklen Materie voneinander unterscheiden.

Grundlage dafür sind mathematische Disziplinen wie Statistik, Informationstheorie, Topologie, Gruppen- und Graphentheorie. Mit ihrer Hilfe entwickeln Bunk und seine Kollegen neue Methoden der Informationsgewinnung oder des *Data Mining – Data Mining*, was so viel heißt wie Datenschnüffeln, umschreibt Mustererkennung beziehungsweise die Erkennung von Regeln in umfangreichen Datensätzen. Weil das Thema theoretisch und praktisch so wichtig ist, arbeiten insgesamt sieben Mitarbeiter des Garchingener Max-Planck-Instituts daran.

Eine der verschiedenen Möglichkeiten, mit denen die Max-Planck-Forscher Muster charakterisieren, bietet die von ihnen entwickelte und inzwischen patentierte Skalierungsindex-Methode. Mit ihrer Hilfe können Wissenschaftler eine Punkteverteilung entsprechend ihrer Dimensionalität in Cluster zerlegen. Die Dimension dieser Cluster wird durch den Skalierungsindex Alpha ausgedrückt: „So liefert beispielsweise eine Häufung von Punkten an einer bestimmten Stelle einen Wert nahe null“, erklärt Bunk. „Eine Linie, die aus Punkten besteht, liefert einen Wert nahe bei



- 1 Das kann nur Vivaldi sein: Die weißen Balken signalisieren die größte Übereinstimmung mit dem barocken Komponisten, aber auch Ähnlichkeiten mit Prokofiev.
- 2 Strichcode für Streichmusik: Ein Solist spielt eine Bachpartita mit sieben verschiedenen Violinen. Die charakteristischen Klangmerkmale ergeben ähnliche Muster farbiger Striche.

eins – und so weiter.“ Eine rein zufällige Verteilung der Punkte liefert als Alpha-Wert immer die Dimension des Raumes, in den sie eingebettet ist – sind die Punkte also wahllos auf einer ebenen zweidimensionalen Fläche verteilt, hat Alpha den Wert zwei. „Das Muster charakterisieren wir dann, indem wir die Häufigkeitsverteilung der Skalierungs-Indizes analysieren, die sich als eine Art Struktur-Spektrum interpretieren lässt“, erklärt Wolfram Bunk. So lassen sich zum Beispiel kosmologische Strukturen in verschiedene Strukturelemente auflösen.

Digitalisierte Multimedia-Daten bestehen – mathematisch gesehen – auch aus Punkteverteilungen, die mithilfe der Mustererkennung analysiert werden können. So wird es möglich, mit den Methoden aus der Astrophysik störendes Rauschen aus Bildern oder Musik zu entfernen oder es zumindest zu reduzieren. Für jedes Pixel eines Bildes kann im statistischen Sinne beispielsweise festgestellt werden, ob es zu einer Struktur – dem eigentlichen Signal – gehört oder reines Rauschen darstellt. „So lassen sich die Rausch-Pixel entfernen, und mithilfe einer Interpolation oder anderen Rekonstruktionsansätzen wird dann aus den verbleibenden Bildpunkten das Foto zumindest teilweise wiederhergestellt“, so Bunk, der auch gleich den Beweis antritt und das Foto einer

hübschen Frau von störendem Datenmüll befreit. „Es gibt aber auch Anwendungen im Automobilbau, zum Beispiel bei der Charakterisierung der Rauigkeit von Zylinder-Oberflächen in Verbrennungsmotoren.“

Und eben auch für die Analyse von Musik: Dafür setzen die Forscher auf ein *Clustering*-Verfahren und analysieren dabei nicht die Struktur-Spektren, sondern Klang-Spektren: Nachdem der Computer die kurzen Audio-Schnipsel in ihre einzelnen Frequenzspektren zerlegt hat, berechnet er ein spezifisches Abstandsmaß zwischen den Spektren – dieses gibt an, wie ähnlich oder unähnlich sie sich sind. Dann werden sie in Klassen eingeteilt – die Cluster, deren Mitglieder sich gleichen. Jetzt kann aus jedem Cluster ein Repräsentant ausgewählt werden. So lässt sich ein ganzes Musikstück durch eine Sequenz von charakteristischen Klängen darstellen, wie sie auch im Erkennungsalgorithmus verwendet werden, und seine Klangstruktur erkennen.

Der digitale Klangexperte kann aber nicht nur den Komponisten unbekannter Stücke identifizieren: Ist ein Werk bereits in der Datenbank vorhanden, erkennt es der Computer auch dann, wenn es sich um eine andere Interpretation handelt. Auch verschiedene Dirigenten können die Wissenschaftler mithilfe des Audio-Finger-

printings auseinanderhalten – selbst die Geigen berühmter Instrumentenbauer identifiziert das System. Und es liefert auch sonst noch manche überraschende Einsicht: Bei einem Stück von Vivaldi zucken nicht nur Balken bei Prokofiev, sondern auch bei der Rockgruppe Pink Floyd, und Brahms sorgt für Bewegung bei Genesis und Peter Gabriel. Es scheint, als gebe es hier unerwartete Gemeinsamkeiten über die Jahrhunderte hinweg – auf die ohne Audio-Fingerprinting wohl niemand gekommen wäre.

MUSIKERKENNUNG FINDET WERBESPOTS

„Derzeit gibt es für das System zwar noch keinen kommerziellen Partner, aber es lässt sich nachgewiesenerweise auch einsetzen, um Werbespots allein aufgrund der Tonspur automatisch zu erkennen“, so Bunk. Das hat durchaus praktische Bedeutung – schließlich möchten TV-Werbekunden wissen, ob ihre teuren Spots auch tatsächlich ausgestrahlt werden. Das kontrollieren heute noch Menschen, die dafür stundenlang Videobänder im Schnelldurchlauf ansehen müssen. Diese eintönige Aufgabe könnten in Zukunft Computer und die Mustererkennung übernehmen. „Später könnte das System auch für die Stimmerkennung ein-

» Aus Musikstücken lassen sich charakteristische Eigenschaften extrahieren – ähnlich den Fingerabdrücken, die charakteristisch für einen Menschen sind.

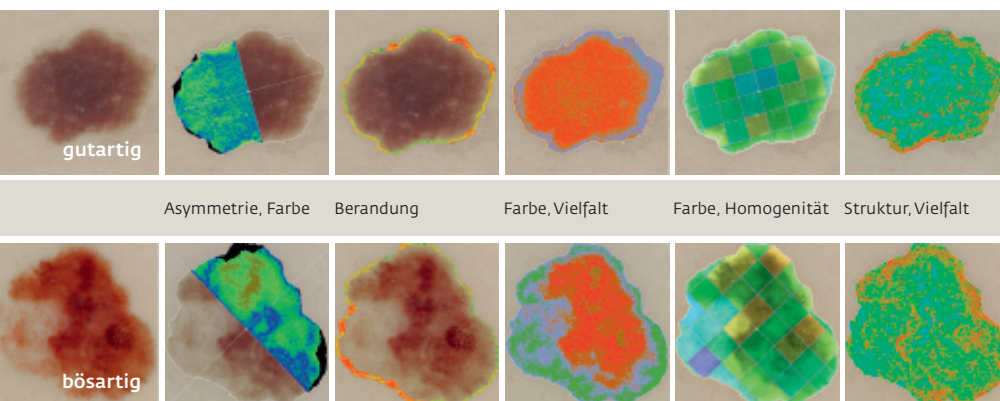
gesetzt werden, etwa für Zugangskontrollen“, so Bunk. Auch die Polizei interessiert sich mittlerweile für die Technik: Das bayerische Landeskriminalamt hat bereits Kontakt zum Team in Garching aufgenommen – ob sich mithilfe von Audio-Fingerprinting tatsächlich die Stimmen von Verdächtigen identifizieren lassen, ist aber noch unklar.

Handfesten Nutzen hat das System aber seit Jahren in der Medizin: Die Mustererkennung aus Garching unterstützt Hautärzte dabei, Melanome rechtzeitig zu erkennen. Bei Vorsorgeuntersuchungen nutzen die Ärzte heute meist ein Dermatoskop, ein Auf-

lichtmikroskop mit zehnfacher Vergrößerung. „Aber selbst mit dem Dermatoskop ist die Diagnose nicht ganz einfach – der Arzt braucht nach wie vor viel Erfahrung“, erklärt Wilhelm Stolz, Chefarzt der Klinik für Dermatologie, Allergologie und Umweltmedizin am Städtischen Klinikum München-Schwabing. „Das ist vor allem bei Ärzten ein Problem, die pro Jahr höchstens zehn bis 20 Patienten mit einem Melanom sehen.“ Zudem sei es nicht immer ganz eindeutig, ob ein Fleck auf der Haut bösartig oder gutartig ist. „Manche Patienten haben auch sehr viele Merkmale, die man nicht alle prophylaktisch entfernen kann“, so Stolz.

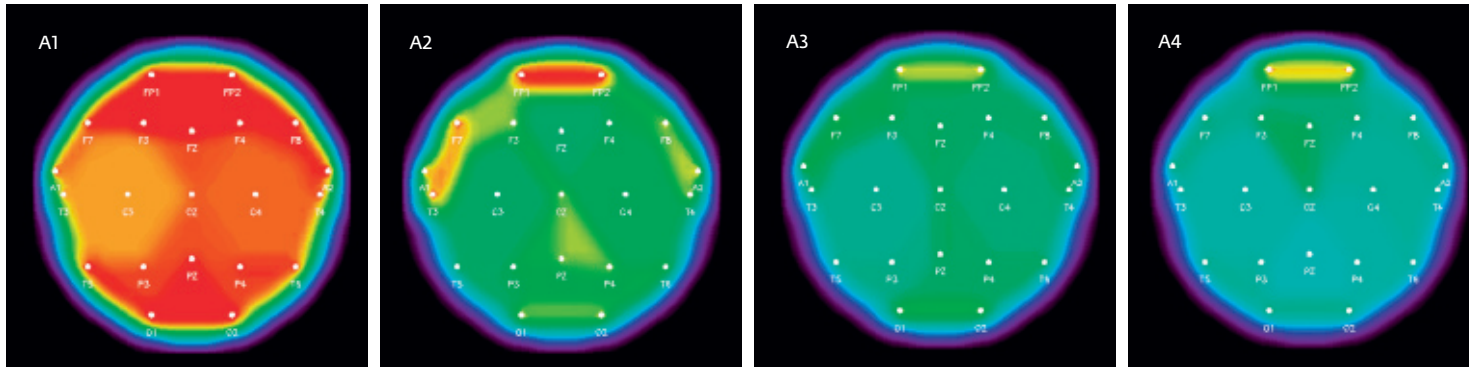
Hier kann die Mustererkennung helfen, den Befund zu objektivieren und unnötige Eingriffe zu vermeiden. Gemeinsam mit dem Informatiker Wolfgang Abmayr von der Hochschule München und den Experten des Max-Planck-Instituts hat Stolz darum den DermoGenius entwickelt: Eine Videokamera nimmt Bilder der verdächtigen Hautpartien auf und sendet sie an einen Computer, der mithilfe der Mustererkennung Melanome identifizieren kann. Wichtige Merkmale der bösartigen Wucherungen sind Asymmetrie, viele verschiedene Farben sowie viele unterschiedliche Strukturen. Sie werden vom Computer analysiert, der am Ende eine Diagnose abgibt und dabei eine Sensitivität von 95 Prozent erreicht. Ein weiterer Vorteil des DermoGenius ist, dass sich verdächtige Stellen im Zeitverlauf verfolgen lassen, weil alle Aufnahmen abgespeichert und miteinander verglichen werden können.

Ein malignes Melanom unterscheidet sich von einer gutartigen Veränderung in mehreren Merkmalen: in der Vielfalt von Struktur und Farbe, der Homogenität und Asymmetrie der Farbe und der Beschaffenheit der Ränder.



ELEKTRONISCHER ASSISTENT MIT ÜBERZEUGUNGSKRAFT

„Ein Experte ist immer so gut wie der DermoGenius, dafür ist der Computer in der Regel aber besser als ein nicht so erfahrener Arzt“, beschreibt Stolz Nutzen und Grenzen des Systems. „In manchen Fällen lassen sich Patienten auch leichter von einer Operation überzeugen, wenn außer dem Arzt auch der Computer eine eindeutige Diagnose abgibt.“ Allerdings muss im Zweifelsfall



Erfolgreiche Therapie: Bei einer Epilepsie feuern Nervenzellen verschiedener Bereiche synchron (rot). Im Lauf der Behandlung nimmt diese Synchronisation deutlich ab (blau).

immer der Mensch entscheiden, der Computer hat nur eine unterstützende Funktion. Daher ist das System insbesondere für niedergelassene Dermatologen interessant: In der Klinik kann ein Arzt in der Regel problemlos einen Kollegen hinzuziehen und ihn nach seiner Meinung fragen – wenn das nicht möglich ist, steht der DermoGenius als Experte in Form eines Computers zur Verfügung. Das Gerät wird heute von der Firma Biocam in Regensburg hergestellt und steht bereits in zahlreichen Arztpraxen.

Bis dorthin hat es eine weitere vielversprechende Entwicklung aus Garching noch nicht gebracht – ist aber auf dem besten Weg dazu: Seit einigen Jahren arbeiten die Forscher gemeinsam mit Stephan Springer, Facharzt für Kinder- und Jugendpsychiatrie und -psychotherapie am Heckscher-Klinikum in München, an der Analyse von Elektroenzephalogrammen (EEG). „Der visuellen Auswertung eines EEG mit durchschnittlich 16 bis 20 Kanälen sind Grenzen gesetzt, da das Signal eine diskontinuierliche Mischung unterschiedlicher Frequenzen, Muster und ereigniskorrelierter, sogenannter Graphoelemente besteht“, erklärt Springer. „Es eignet sich aber hervorragend für eine mathematische Analyse.“

Mit ihrer Hilfe können Eigenschaften der Signale ausgewertet werden, die der Mensch visuell nicht erkennen kann: In einem EEG gibt es eine Grundaktivität mit einer Frequenz von rund

zehn Hertz sowie viele andere Frequenzen, die insgesamt ein sehr unübersichtliches Bild ergeben. „Ein Arzt kann mit jahrelanger Übung ein Gefühl für Frequenzwechsel, Frequenzmischungen und Formen entwickeln und dann allenfalls stärkere Abweichungen bemerken, während kleinere Änderungen visuell nicht festgestellt werden können“, sagt Springer. In den Minuten vor einem epileptischen Anfall werde beispielsweise die Schwingungsamplitude kleiner, während sich die Frequenz erhöht. Das deutet darauf hin, dass im Gehirn Hemmungen abgebaut werden und ein Anfall auftritt, eventuell verbunden mit Bewusstlosigkeit. Den Zeitraum einer Anfallsvorhersage zu verlängern, war wichtigstes Ziel früherer mathematischer EEG-Analysen.

AUFFÄLLIGE INTERAKTIONEN DER HIRNHÄLFTEN

Im ersten Schritt der Zusammenarbeit mit Wolfram Bunk und seinen Kollegen wurden die EEGs eines zwölfjährigen Patienten untersucht, von dem zahlreiche EEG-Aufzeichnungen aus mehreren Jahren vorlagen. Er litt an einer Frontallappenepilepsie, die hartnäckig und nur sehr schwer zu behandeln ist. Zudem können die Ärzte bei dieser Variante der Epilepsie zwischen den Anfällen im EEG visuell nur wenig erkennen. Darum lag es nahe, in den erfassten Hirnströmen nach auffälligen Mustern zu suchen und sie mit der Ent-

wicklung des klinischen Bildes, das sich die Ärzte gemacht hatten, in Zusammenhang zu bringen.

Mit Erfolg: „Die Untersuchungen haben ergeben, dass bei dem Patienten die Wechselwirkungen zwischen der linken und der rechten Gehirnhälfte gegenüber einem Kollektiv unauffälliger Kinder deutlich verändert waren“, berichtet Springer. Starke Wechselwirkungen zwischen den vorderen und hinteren Gehirnregionen sind normal – wahrscheinlich weil sie durch zahlreiche Nerven miteinander verbunden sind. Es gibt aber nur wenige definierte Bahnen zwischen den beiden Hemisphären unseres Denkapparates – darum deuteten die ungewöhnlichen Aktivitäten auf einen Zusammenhang mit der Epilepsie hin. „Die Mustererkennung ist deshalb so wertvoll, weil diese Wechselwirkungen visuell nicht zu erkennen wären“, so der Experte und verweist auf weitere Indizien: „Das Auftreten und der Rückgang der Auffälligkeiten verliefen ungefähr parallel mit dem Auftreten und der Besserung der schweren psychiatrischen Auffälligkeiten im Rahmen der Epilepsie.“

Im nächsten Schritt sollen drei verschiedene Gruppen von jeweils rund 20 jungen Patienten untersucht werden: gesunde Kinder, Kinder mit Autismus sowie Kinder mit Epilepsie und Autismus. Autistische Kinder leiden deutlich häufiger an Epilepsie als gesunde Kinder, und die Ärzte hoffen nun, mithilfe

» Mustererkennung hat sich als gutes Diagnoseinstrument für die Epilepsie erwiesen – besser als andere Ansätze, die es in diesem Bereich bisher gegeben hat.

der Mustererkennung schneller die richtige Therapie zu finden – sowohl zur Behandlung der epileptischen Anfälle als auch der Begleitsymptome. Erste Ergebnisse werden ab Herbst erwartet.

BESSERE KONTROLLE ÜBER DIE THERAPIE

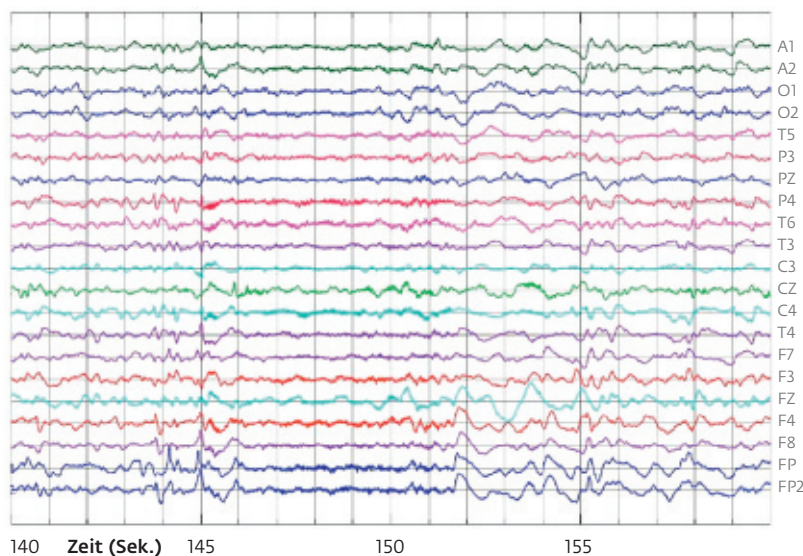
Die Ärzte erwarten neben neuen Erkenntnissen zu neurophysiologischen Ursachen der Symptome auch, dass sie den Erfolg einer Epilepsie-Therapie wesentlich besser kontrollieren können. „Derzeit hat man die Auswahl aus mehr als 20 verschiedenen Medikamenten, und für jeden Patienten muss die individuell optimale Kombination von Wirkstoffen gefunden werden“, erklärt Springer. „Es dauert heute in der Regel

einige Monate, die Therapie zu optimieren.“ Für die betroffenen Kinder bedeutet das: Ihre Lebensqualität leidet und sie verpassen wichtige Lernphasen. Und ist die Therapie nicht optimal, leiden die kleinen Patienten auch unter Nebenwirkungen, zum Beispiel verringertem Sprechvermögen, Konzentrationsproblemen oder emotionalen Schwierigkeiten.

Die Mustererkennung kann in Zukunft aber auch für die Untersuchung von Erwachsenen eingesetzt werden. Hier sind die Verhältnisse sogar einfacher, denn bei Kindern reift das Gehirn während der Entwicklung noch, wodurch sich das EEG ebenfalls verändert – das ist bei Erwachsenen nicht der Fall. „Zusammenfassend kann man sagen, dass sich Verfahren der Mustererkennung als bestes Diagnoseinstrument ge-

genüber anderen Ansätzen erwiesen haben, die es in diesem Bereich bisher gegeben hat“, lobt Springer. Ein Vorteil des Verfahrens sei auch, dass es relativ unempfindlich gegen Artefakte ist – also gegen Schwankungen des EEG, die beispielsweise durch Bewegungen des Patienten hervorgerufen werden und nichts mit einem epileptischen Anfall zu tun haben.

Was Astrophysik mit Beethoven oder gar mit der Epilepsie zu tun hat, klingt wie eine Rätselfrage. Ein Rätsel, das die Garchingener Forscher auf doppelte Weise lösen. Denn Mustererkennung ist in vielen Disziplinen gefragt und sie enthüllt verborgene Ähnlichkeiten – nicht nur zwischen Vivaldi und Prokofiev. MI 0207-3802-WT-WA ◀



Das Muster eines bevorstehenden epileptischen Anfalls kann auch ein erfahrener Arzt im EEG kaum erkennen. Um einen Schub besser vorherzusagen, helfen Methoden der Garchingener Astrophysiker.

GLOSSAR

Mustererkennung

Sucht Regelmäßigkeiten, Wiederholungen, Ähnlichkeiten oder Gesetzmäßigkeiten in einer Menge von Daten, die etwa flächige, räumliche oder akustische Strukturen beschreiben.

Skalierungsindex-Methode

Der Skalierungsindex gibt an, wie Punkte in einem betrachteten Bereich verteilt sind. Die Häufigkeitsverteilung der Skalierungsindizes charakterisiert das Muster.

Clustering-Verfahren

Audioschnipsel etwa eines Komponisten werden in Cluster ähnlicher Klangspektren eingeteilt. Ein unbekanntes Musikstück wird mit Repräsentanten aus den Clustern verglichen.

Elektroenzephalografie (EEG)

Am Kopf angebrachte Elektroden messen Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche. Diese Messungen geben Aufschluss über die elektrische Aktivität des Gehirns.